

Windsichter, verfahrenstechnische Maschinen zur Herstellung definierter pulverförmiger Produkte

Leschonski, Kurt

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 1988 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.175-196



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Windsichter, verfahrenstechnische Maschinen zur Herstellung definierter pulverförmiger Produkte

Von **Univ. Prof. Dr.-Ing. Kurt Leschonski**, Technische Universität Clausthal

1. Einleitung

Seitdem Menschen Getreide für ihre Ernährung verwendeten, mußten sie in des Wortes ursprünglicher Bedeutung die Spreu vom Weizen trennen. Für diese Trennung wurde ein sehr einfaches, noch heute bei primitiven Völkern übliches, aber im Grunde genommen wenig effektives Verfahren verwendet. Abb. 1 zeigt ein Beispiel aus der Ägyptischen Kultur[1]. Es handelt sich um ein Wandbild aus dem Grab von Nakht aus der XVIII. Dynastie, die auf ca. 1555–1308 vor Christus datiert wird. Das nach dem Dreschen aus Schalen und Getreidekörnern bestehende Gemisch wird mit Schaufeln in die Höhe geworfen, und die Schalenanteile werden durch den über den Erdboden streichenden Wind, quer zur Wurfrichtung, ausgetragen.

Im Evangelium Matthäus, 3. Kapitel, Vers 12, heißt es: „und er (Jesus) hat seine Wurfschaufel in der Hand: er wird seine Tenne fegen und den Weizen in seiner Scheune sammeln, aber die Spreu wird er verbrennen mit ewigem Feuer“. Dieser Vers wird landläufig durch die bereits zitierte Aussage: „die Spreu vom Weizen sondern“ stark verkürzt wiedergegeben. Abb. 2 zeigt eine chinesische Darstellung des früher auch „worfeln“ genannten Getreidereinigens[2]. Die hier dargestellte Methode der Trennung von Spreu und Weizen nimmt bereits Rücksicht darauf, daß es wenig sinnvoll war, das auf einer Fläche ausgebreitete Gemisch aus Spreu und Weizen schaufelweise an dieser Stelle in die Höhe zu werfen, da das von der Spreu befreite Gut auf das noch verunreinigte Gemisch zurückfiel. Die Reinigungswirkung folgt dabei einer Exponentialfunktion und eine vollkommene Reinigung ist theoretisch unmöglich.

Unter Klassieren versteht man das Trennen eines Partikelgemisches nach der Größe, d.h. nach einer geometrischen Eigenschaft, oder aber nach der Sinkgeschwindigkeit der Partikel in einem Fluid. Handelt es sich bei dem verwendeten Fluid um Luft, so spricht man vom „Windsichten“. Im Gegensatz dazu versteht man in der Weizen- und Roggenmüllerei unter „Sichten“ das Sieben von Mehl, d.h. das Trennen nach der Partikelgröße an einer Vielzahl von runden, quadratischen oder schlitzförmigen Öffnungen.

Die Trenngrenzen heutiger Windsichter beginnen, sofern mineralische Rohstoffe klassiert werden sollen, bei etwa 1 µm und enden bei einigen 100 µm. Die Massendurchsätze schwanken zwischen einigen Gramm pro Stunde bei Analysen-Sichtern und einigen hundert Tonnen pro Stunde bei technischen Sichtern, wie sie z.B. bei der Zement-sichtung eingesetzt werden[3].

Um Produkte bestimmter Eigenschaften zu erzielen, ist es in vielen technischen Anwendungen erforderlich, die Partikelgrößenverteilung des z.B. durch Zerkleinern



Abb. 1:
Wandbild aus dem Grab von Nakht aus der XVIII. Dynastie[1]



Abb. 2:
Worfeln, chin. Darstellung[2]

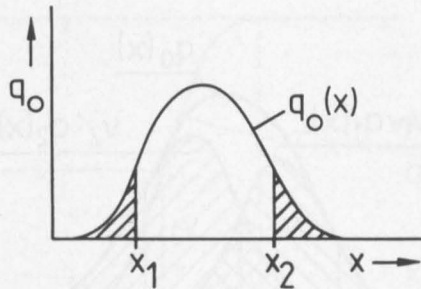


Abb. 3:
Dichte-Verteilungskurve, $q_0(x)$

erzielten dispersen Produktes durch Abtrennen grober (Trenngrenze: x_2) und/oder feiner Partikel (Trenngrenze: x_1) auf eine bestimmte, für die technische Anwendung besser geeignete Größenverteilung zu korrigieren (siehe Abb. 3).

So ist es z.B. bei Schleifmittelkörnungen erforderlich, einzelne grobe Partikel, sogenanntes Spritzkorn, aus der erwünschten Verteilung zu entfernen, um beim Schleifen Überraschungen, verursacht durch Kratzer in der zu bearbeitenden Oberfläche, zu vermeiden. Bei einer Zahnpasta sollte der disperse mineralische Rohstoff, z.B. Kalkstein, eine obere Partikelgröße von 10 μm bis 15 μm nicht überschreiten, da man gröbere Partikel auf den Zahnoberflächen noch als Einzelpartikel fühlt und die Paste als „sandig“ empfunden wird.

Feinste Partikel können bei bestimmten Produkten erwünscht, aber auch unerwünscht sein. Sie verändern nämlich z.B. die Fließeigenschaften eines dispersen Produktes und müssen deshalb bei manchen Anwendungen durch Klassieren entfernt werden.

Die Qualität einer Klassierung wird durch die sogenannte Trennschärfe bestimmt. Windsichter sind deshalb sowohl strömungstechnisch als auch konstruktiv so zu gestalten, daß möglichst hohe Trennschärfen erzielt werden.

In jüngster Zeit, insbesondere im Hinblick auf die Erzeugung von „neuen Werkstoffen“, z.B. von gesinterten, aus feinsten Partikeln bestehenden keramischen Werkstoffen, werden verstärkt geeignete Klassierverfahren nachgefragt, die auch im Partikelgrößenbereich unter 1 μm für trennscharfe Klassierungen verwendet werden können.

2. Kennzeichnung einer Trennung[4]

Das Ziel einer Klassierung besteht, wie in Abb. 4 dargestellt, darin, ein disperses Aufgabegut bei einer vorgegebenen Partikelgröße, x_1 , der Trennkorngröße, in ein aus im wesentlichen feinen Partikeln bestehendes Feingut und ein aus größeren Partikeln bestehendes Grobgut zu trennen. Die in Abb. 4 als Beispiel angenommenen Glockenkurven geben die Dichte-Verteilungskurven des Aufgabegutes, $q_0(x)$, und die mit den Massenanteilen des Feingutes, v_1 , und des Grobgutes, v_2 , gewichteten Dichte-Vertei-

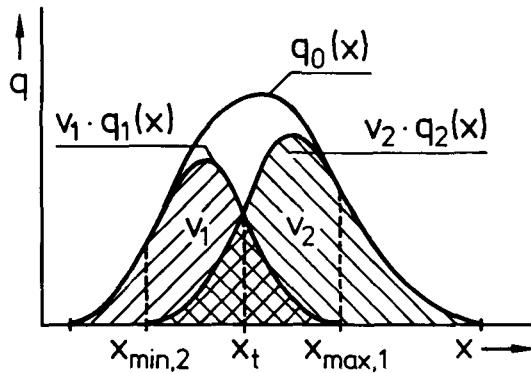


Abb. 4:
Dichte-Verteilungskurven des Aufgabe-, Fein- und Grobgutes

lungskurven, $v_1 q_1(x)$ und $v_2 q_2(x)$, der beiden Fraktionen wieder. Die Summe der Massenanteile, v_1 und v_2 , die die schraffiert dargestellten Flächen unterhalb der Dichte-Verteilungskurven des Fein- und Grobgutes darstellen, entsprechen 100% bzw. der Fläche unterhalb der Dichtekurve des Aufgabegutes.

Die Dichte-Verteilungskurven der Fraktionen überschneiden sich im Bereich mittlerer Partikelgrößen. In diesem Bereich läßt sich aus den Dichte-Verteilungskurven die sogenannte Trennkurve, $T(x)$, aus dem Verhältnis der Ordinatenwerte des Grobgutes, $v_2 q_2(x)$, und des Aufgabegutes, $q_0(x)$, in Abhängigkeit von den Partikelgrößen, x , berechnen:

$$T(x) = \frac{v_2 q_2(x)}{q_0(x)} \quad (1)$$

Die in Abb. 5 dargestellte Trennkurve charakterisiert die Lage und die Qualität, d.h. die Trennschärfe, einer Trennung. Als Lageparameter, der Trenngrenze genannt wird, verwendet man bevorzugt den Medianwert der Trennkurve, d.h. diejenige Partikelgröße, bei der die Trennkurve den Wert 50% = 0,5 annimmt. Diese Partikelgröße wurde bei der ausgeführten Trennung je zur Hälfte auf das Fein- bzw. Grobgut verteilt. Als Trennschärfemaße verwendet man unterschiedliche, aus den Dichte-Verteilungskurven der Produkte der Klassierung oder dem Verlauf der Trennkurve abgeleitete Kennwerte, die z.B. die Steigung der Trennkurve im mittleren Partikelgrößenbereich wiedergeben[4].

Das Ziel einer Klassierung besteht im allgemeinen darin, eine Trennung des Aufgabegutes bei einer vorgegebenen Trenngrenze mit möglichst hoher Trennschärfe vorzunehmen. Während die Trenngrenze vor allem durch die gewählten Strömungsbedingungen und die dadurch auftretenden Widerstandskräfte sowie andere, die determinierte Partikelbewegung unterstützenden Kräfte, wie z.B. die Schwerkraft, Zentrifugalkräfte, die elektrischen Kraft usw. bestimmt wird, hängt die erreichbare Trennschärfe

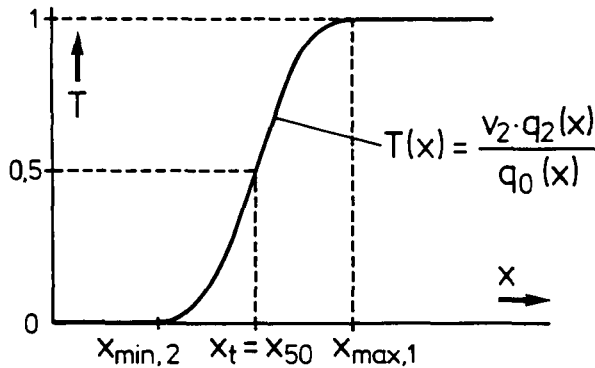


Abb. 5:
Trennkurve

und damit der Verlauf der Trennkurve vor allem von zufällig, d.h. stochastisch auftretenden Störungen, wie z.B. der Strömungsturbulenz, gegenseitigen Partikelstößen usw.[5] ab.

3. Sichtprinzipien

Ein Windsichter besteht aus einer von Luft durchströmten Trennzone, in die die zu sichtenden Partikel an einer geeigneten Stelle eingebracht werden. Sie müssen in dieser auf größen- bzw. sinkgeschwindigkeitsabhängigen Bahnkurven so geführt werden, daß feine und grobe Partikel getrennt voneinander an unterschiedlichen Orten aus der Trennzone austreten können.

Windsichter lassen sich im wesentlichen in:

Gegenstrom- und Querstromanordnungen

unterteilen.

Bei Gegenstromsichtern wird das Grobgut entgegen der Strömung aus der Trennzone ausgetragen, während sich bei Querstromsichtern meist alle Partikelgrößen quer zur Strömung bewegen und dadurch aus ihr größenabhängig ausgetragen werden können.

Darüber hinaus lassen sich Windsichter nach den in der Trennzone vorherrschenden Strömungsfeldern und den die determinierte Partikelbewegung unterstützenden Kräften unterteilen.

Man unterscheidet deshalb zwischen Sichtern mit Strömungen, deren Stromlinien entweder:

geradlinig oder gekrümmt

sind.

Die wichtigsten an den Partikeln angreifenden Kräfte sind die vom Fluid auf die Partikeloberfläche ausgeübte:

Widerstandskraft,

und Feldkräfte, wie:

die Schwerkraft,
die Fliehkraft und
die elektrische Kraft,

sowie Kräfte, die infolge beschleunigter Partikelbewegung auftreten, wie die:

Trägheitskraft.

Handelsübliche technische Windsichter sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt nahezu ausschließlich Schwerkraft- bzw. Fliehkraft-Gegenstromsichter[6].

3.1 Die Gegenstrom-Schwerkraftsichtung

Das Prinzip der Gegenstromsichtung ist in Abb. 6 dargestellt.

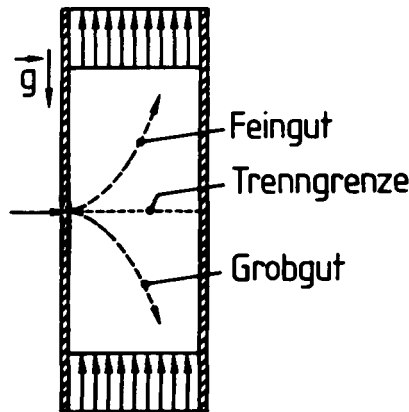


Abb. 6:
Prinzip der Gegenstrom-Schwerkraftsichtung

In einem lotrecht angeordneten Rohr mit kreisförmigem oder rechteckigem Querschnitt steigt Luft mit der Geschwindigkeit, v , nach oben. In diesem Luftstrom, von dem angenommen werden soll, daß seine Steiggeschwindigkeit an allen Stellen des Querschnitts und auch über der Rohrlänge konstant ist, werden Partikel einzeln und nacheinander eingebracht. In der Strömung unterliegen die Partikel vor allem der nach oben gerichteten Schleppkraft der Strömung und der nach unten gerichteten Schwerkraft. Die Partikel sedimentieren mit ihrer Sinkgeschwindigkeit, w_g :

$$w_g = \frac{\rho_p g}{18\eta} x^2 \quad (2)$$

nach unten und werden durch die aufsteigende Luft mit der Strömungsgeschwindigkeit, v , nach oben bewegt. Ihre Geschwindigkeit entspricht der Differenz beider Geschwindigkeiten:

$$v_p = v - w_g = v - \frac{Q_p g}{18\eta} x^2 \quad (3)$$

Partikel, deren Sinkgeschwindigkeit, w_{gt} , gerade gleich der Strömungsgeschwindigkeit, v , ist, verbleiben im Sichtraum in der Schwebelage. Daraus folgt:

$$v = \frac{Q_p g}{18\eta} x_t^2 = w_{gt} \quad (4)$$

Dagegen folgen Partikel mit Sinkgeschwindigkeiten $w_g < v$ der Strömung und werden als Feingut ausgetragen, während Partikel mit $w_g > v$ entgegen der Strömung ins Grobgut gelangen.

Dieses Sichtprinzip findet man sowohl im Mährescher als auch in den bislang größten Windsichtern, den Umluftlichtern der Zementindustrie. Es stellt trotz einiger gravierender Nachteile infolge seines einfachen Aufbaus eines der bedeutendsten Sichtprinzipien für Klassierungen im Trenngrenzbereich oberhalb von etwa 30 μm dar. Dem Vorteil der Einfachheit stehen vor allem zwei herausragende Nachteile gegenüber:

Bei allen Gegenstrom-Anordnungen ermöglicht eine Sichtereinstellung nur einen einzigen Trennschnitt bei einer bestimmten Trenngrenze, weshalb sich das Aufgabegut nur in zwei Produkte, ein Feingut und ein Grobgut klassieren läßt. Darüber hinaus ist der mögliche Massendurchsatz eine Funktion der Trennkorngröße, da die einzustellende Strömungsgeschwindigkeit von der Trenngrenze bestimmt wird.

Da z.B. die stationäre Sinkgeschwindigkeit von 10 μm Quarzpartikeln nur etwa 0,8 cm/s beträgt, sind große Trennzonenquerschnitte für technisch interessante Massendurchsätze erforderlich, die insbesondere im Hinblick auf eine gleichmäßige Verteilung der Aufgabegutpartikel über dem Querschnitt Probleme mit sich bringen.

In Abb. 6 wurde angenommen, daß sich die Geschwindigkeit des aufsteigenden Luftstroms weder über dem Querschnitt noch über der Rohrlänge ändert. Dies ist tatsächlich nicht der Fall. Selbst bei einer Gleichverteilung der Strömungsgeschwindigkeiten am Rohreinlauf entwickelt sich mit der Rohrlänge ein Strömungsprofil, wie in Abb. 7 dargestellt, das bei laminarer Strömung durch die Geschwindigkeitsverteilung:

$$\frac{v(r)}{v_{\max}} = 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad (5)$$

beschreibbar ist. In einer derartigen Einlaufströmung verändert sich die Strömungsgeschwindigkeit auf einem Strömungsfaden längs der Rohrachse, mit einer Verzögerung der Strömung in Wandnähe und einer Beschleunigung im Zentrum[7]. Darüber hinaus

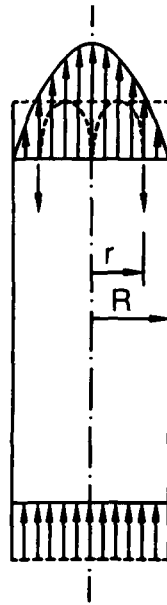


Abb. 7:
Profilausbildung bei laminarer Strömung

findet in der Einlaufzone aus Kontinuitätsgründen eine Strömungsverdrängung zur Mitte des Rohres hin statt.

Befindet sich ein Partikel auf einem verzögerten Stromfaden, so bestimmt dessen kleinste Geschwindigkeit, die am oberen Rohrende erreicht wird, die Trennung. Partikel, die die Einlaufzone passiert haben, und Sinkgeschwindigkeiten aufweisen, die oberhalb dieser Strömungsgeschwindigkeit liegen, erreichen bereits auf tiefer liegenden Ebenen die Geschwindigkeitsgleichheit. Sie bleiben deshalb an dieser Stelle in der Schwebe.

Auf einem beschleunigten Stromfaden hingegen findet ein nach oben mitgenommenes Partikel stets größere Steiggeschwindigkeiten als die eigene Sinkgeschwindigkeit vor. Diese Partikel werden beschleunigt zum oberen Rohrende transportiert. Ihre Sinkgeschwindigkeit stimmt mit der kleinsten, am unteren Rohrende auftretenden Strömungsgeschwindigkeit überein.

Bei stetiger Gutzugabe läßt sich deshalb die theoretisch zu erwartende Trennkurve aus der Verteilung der jeweils kleinsten Geschwindigkeiten im Rohrquerschnitt vorausberechnen.

Partikel, die in der Mitte des Rohres das obere Ende erreicht haben, sollten ohne Schwierigkeiten ins Feingut gelangen können. Sie müssen jedoch dazu quer zur Strömung aus dieser ausgetragen werden. Dabei kreuzen die Partikel Zonen geringerer

Strömungsgeschwindigkeit. Ist ihre Sinkgeschwindigkeit größer als die örtliche Strömungsgeschwindigkeit, so werden sie nicht ausgetragen, sondern fallen erneut auf tiefere Ebenen zurück. Sie müssen in einem zweiten Anlauf erneut ihr Glück versuchen. Ein Vorgang, der sich fast beliebig wiederholen kann und zu extrem langen Sichtzeiten führt.

Aus dem bisher Gesagten kann man folgern, daß ein Gegenstrom-Schwerkraftsichter folgende Eigenschaften aufweisen sollte:

1. Eine Profilausbildung der Strömung in der Trennzone sollte vermieden werden. Dies läßt sich z.B. durch eine möglichst kurze Trennzone erreichen.
2. Die Strömungsgeschwindigkeit sollte beim Eintritt in die Trennzone gleichverteilt sein, was durch geeignete strömungstechnische Maßnahmen sichergestellt werden kann.
3. Oberhalb der Trennzone sollte eine beschleunigte Strömung vorliegen.

Ein Schwerkraft-Gegenstromsichter für Analysentrennungen, der diesen Anforderungen genügt, wurde von K. Leschonski und H. Rumpf[7] vor Jahren entwickelt und von M. Weilbacher[8] untersucht.

Wie in Abb. 8 gezeigt, wird der kurzen, nur 1 cm hohen Trennzone die Sichtluft durch ein Sieb oder ein Membranfilter zugeführt. Oberhalb der Trennzone wird die Luft auf die vierfache Austrittsgeschwindigkeit beschleunigt, und die feinen Partikel werden aus der Luft entweder durch Sedimentieren oder durch Filtrieren abgeschieden.

Abb. 9 zeigt, daß es durch diese Maßnahmen möglich war, die Sichtzeiten bis zum Erreichen gleicher Rückstände auf dem Anströmboden um etwa eine Zehnerpotenz

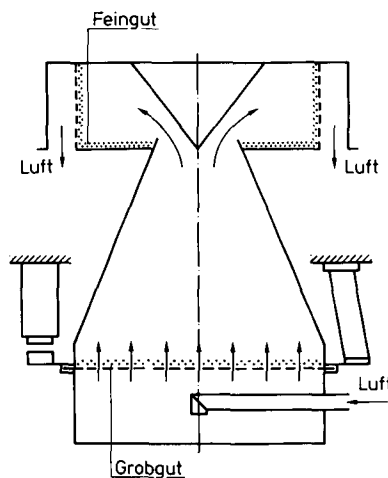


Abb. 8:
Gegenstrom-Schwerkraftsichter mit extrem niedriger Trennzone

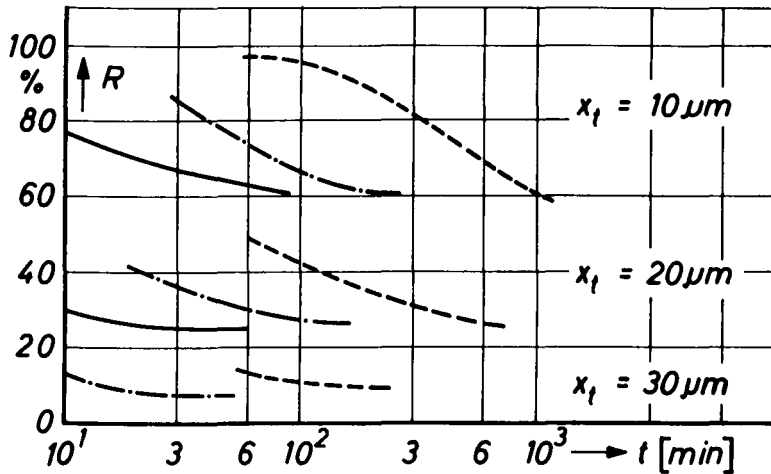


Abb. 9:

Verminderung des Rückstandes auf dem Anströmboden mit der Sichtzeit

(-·-) gegenüber einem Siehter mit langem Rohr (ca. 1 m) (---) zu senken. Durch Zugabe eines oberflächenaktiven, das Dispergieren des Aufgabegutes unterstützenden Stoffes ließen sich die Sichtzeiten weiter verringern (-). Dieses Beispiel zeigt, daß auch dem Dispergieren des Aufgabegutes entsprechende Aufmerksamkeit geschenkt werden muß.

3.2 Gegenstrom-Fliehkraftsichter

Ein Gegenstrom-Fliehkraftsichter besteht, wie schematisch in Abb. 10 dargestellt, aus einer flachen, kreiszylindrischen Trennzone, die von der Sichtluft von außen nach innen durchströmt wird. Dieser Senkenströmung wird, z.B. mittels geeigneter Leitschaufeln, ein Drall überlagert, so daß sich in der Trennzone eine Spiralströmung ausbildet. Diese Windsichter werden deshalb Spiralwindsichter genannt. Das erstmals von H. Rumpf[9] untersuchte Sichtprinzip hat eine hohe Bedeutung für technische Trennungen im Trenngrenzenbereich von etwa $1\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$ bis zu einigen $10\text{ }\mu\text{m}$ erlangt.

Die Trennkorngröße bewegt sich theoretisch in der Trennzone des Spiralwindsichters, im radialen Kräftegleichgewicht zwischen Widerstandskraft und Fliehkraft, auf einem Kreis. Die Trenngrenze läßt sich mit der radialen Geschwindigkeitskomponente der Strömung, v_r , und der Umfangskomponente, v_φ , aus Gl. 5 berechnen.

Aus:

$$3\pi\eta x_t v_r = \frac{\pi x_t^3}{6} \varrho_p \frac{v_\varphi^2}{r} \quad (5)$$

erhält man:

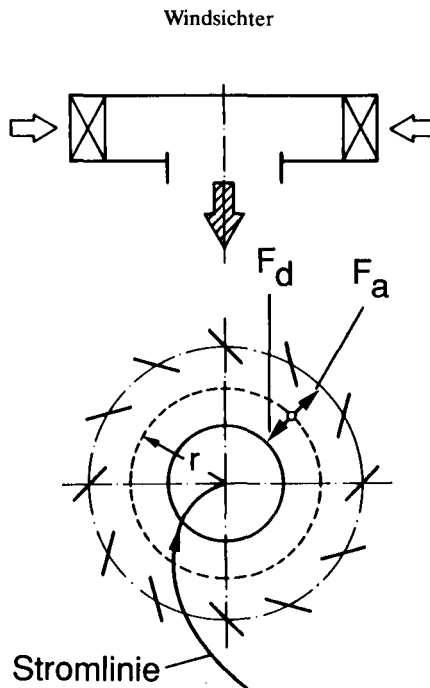


Abb. 10:
Schema eines Spiralwindsichters

$$v_r = \frac{\rho_p x_t^2}{18\eta} \frac{v_\varphi^2}{r} = w_{at} = \frac{w_{gt} v_\varphi^2}{gr} = St \cdot v_\varphi \quad (6)$$

Danach ist die radiale Komponente der Strömungsgeschwindigkeit, v_r , der Sinkgeschwindigkeit der Partikel im Fliehkraftfeld, w_{at} , gleichzusetzen. Für die Vorausberechnung der Trennkorngröße (Gl. 6) findet man eine ähnlich einfache Beziehung wie bei der Gegenstrom-Schwerkraftsichtung. St ist die sogenannte *Stokes-Zahl*, die für die Trennkorngröße gleich dem Geschwindigkeitsverhältnis v_r/v_φ ist.

Streng genommen hängt die auf die Partikel wirkende Fliehkraft nicht von der Umfangskomponente, v_φ , der Strömung, sondern von der tatsächlich vorliegenden Partikel-Umfangsgeschwindigkeit, u_p , ab, die wegen des auftretenden Schlupfes kleiner als v_φ ist. Man setzt vereinfachend:

$$u_p = v_\varphi \quad (7)$$

wohl wissend, daß man weder u_p noch v_φ genau genug kennt, um treffsichere Vorausberechnungen der Trenngrenze, x_t , durchführen zu können. Nach Gl. 6 hängt die Trenngrenze von dem Verhältnis v_φ/v_r , d.h. der Steilheit der spiralförmigen Stromlinie, ab.

Die sich in der Trennzone frei einstellende Spiralströmung läßt sich zwar durch die Kontinuitätsgleichung:

$$v_r r = \text{konstant} \quad (8)$$

und die den Verlauf der Umfangskomponente der Strömung beschreibende Gl. 9:

$$v_\varphi r^n = \text{konstant} \quad (9)$$

beschreiben. Der Exponent, n , der Drallströmung hängt jedoch von einer Reihe von Einflußgrößen, wie z.B.:

der Partikelgrößenverteilung des Aufgabegutes, $Q_0(x)$, und

der Gutbeladung, μ , der Trennzone

ab. Beide beeinflussen den Impulsaustausch zwischen der Luftströmung und den Partikeln.

Spiralwindsichter lassen sich deshalb zwar angenähert auf eine bestimmte Trenngrenze einstellen, die tatsächlich erzielte Trenngrenze muß jedoch aus den Produkten der Trennung, wie eingangs dargestellt, ermittelt werden.

In der in Abb. 10 schematisch dargestellten Trennzone eines Spiralwindsichters stellt sich nicht nur die beschriebene, den größten Teil der Trennzone erfassende Kernströmung ein, sondern in Wandnähe, insbesondere an den beiden Seitenwänden, wird die Kernströmung durch eine Grenzschichtströmung verändert. In Stirnwandnähe sind deshalb sowohl die Umfangs- als auch die Radialkomponente der Strömung geringer

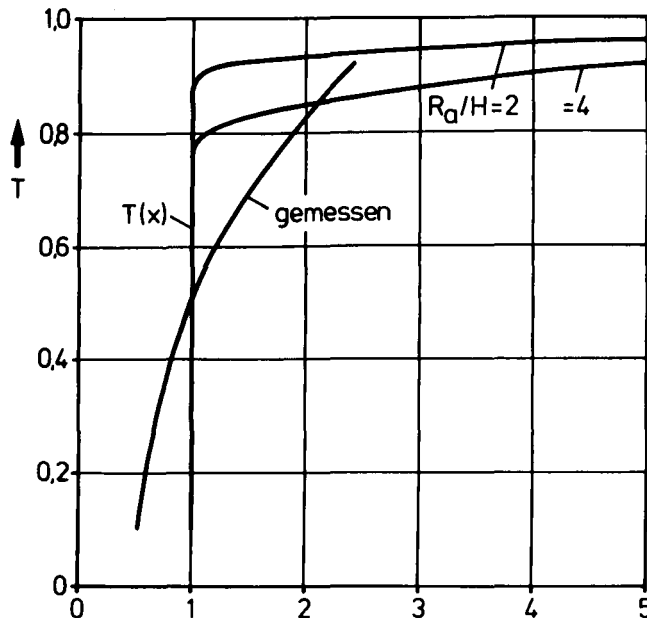


Abb. 11:
Einfluß der Grenzschichtströmung auf die Trennkurve von Spiralwindsichtern

als in der Kernströmung. Dies führt in der Grenzschicht zu steiler verlaufenden spiralförmigen Stromlinien, die gröbere Trenngrenzen als die Kernströmung besitzen.

Spiralwindsichter mit feststehenden Seitenwänden können deshalb, wie *H. Rumpf* und *K. Leschonski*[5] zeigten, die in Abb. 11 dargestellten Trennkurven mit einem hohen, unerwünschten Grobgutanteil aufweisen. Die Grenzschichtrechnungen wurden von *F. Ebert*[10] durchgeführt.

Dieser Effekt läßt sich vermeiden, wenn man, wie von *F. Kaiser* und *H. Rumpf*[11] vorgeschlagen, beide Seitenwände mit einer mittleren Umfangsgeschwindigkeit mitrotieren läßt. Dadurch wird die Geschwindigkeit der Strömung in Umfangsrichtung vergrößert, und in der Grenzschicht sich aufhaltende Partikel werden ins Grobgut verwiesen.

Ein Beispiel für Spiralwindsichter mit rotierenden Seitenwänden ist der in Abb. 12 dargestellte und seit vielen Jahren von der Fa. Alpine AG, Augsburg hergestellte Spiralwindsichter „Mikroplex“.

Diese Maßnahme reicht jedoch nicht aus, um z.B. den durch die Partikelbeschleunigung verursachten Impulsstromverlust zu kompensieren.

Die Zugabe von Feststoff zur Spiralströmung der Trennzone verringert nämlich die Umfangsgeschwindigkeit der Strömung. Kleinere Umfangsgeschwindigkeiten führen aber bei unveränderter Radialgeschwindigkeit zu größeren Trenngrenzen. Dieser Impulsaustausch ist eine der Ursachen dafür, daß Spiralwindsichter sich nicht auf Trenngrenzen um oder unter $1\text{ }\mu\text{m}$ einstellen lassen.

Aus diesem und aus anderen Gründen hat man deshalb versucht, mit einem beschauften Sichterrad die für Feinsttrennungen erforderliche Umfangsgeschwindigkeit unabhängig von der Partikelbeladung der Strömung aufrechtzuerhalten.

Das Sichterrad besitzt am äußeren Umfang, wie in Abb. 13 dargestellt, unterschiedliche „Schaufeln“. Es werden sowohl kreiszylindrische Stäbe (Korbsichter) als auch

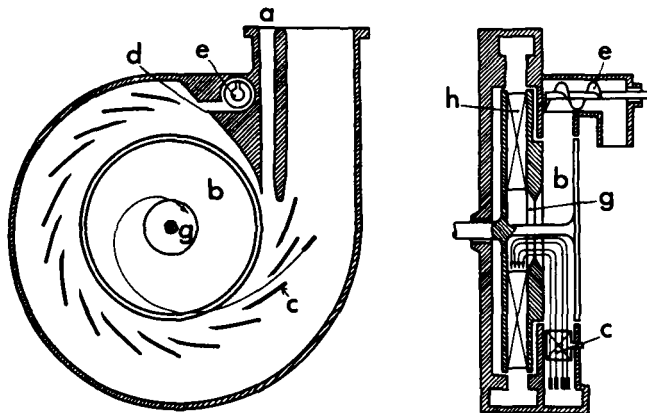


Abb. 12:
Spiralwindsichter der Fa. Alpine AG

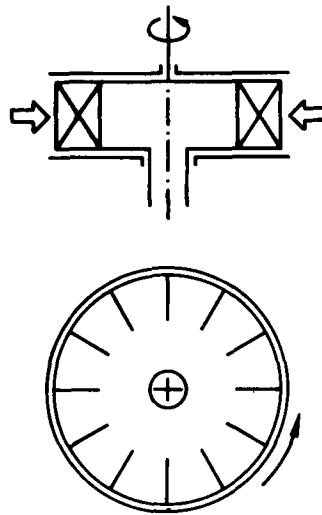


Abb. 13:
Schema eines Abweiseradsichters

gerade unprofilierter Schaufeln verwendet. Die Schaufeln sind entweder radial oder unter einem Winkel zum Radius angeordnet.

Entsprechend der angestrebten Wirkung, das Grobgut nicht durchzulassen, werden diese Windsichter meist „Abweiseradsichter“ genannt. Sie werden zwar weltweit von einer Reihe von Firmen gebaut, eine einigermaßen zuverlässige Vorausberechnung ist jedoch bis heute nicht möglich.

Zwar läßt sich die Trenngrenze angenähert mit den bereits genannten Formeln der Spiralwindsichtung vorausberechnen, über den Einfluß der Schaufelform und der Anzahl der Schaufeln ist jedoch bislang wenig bekannt. Diese Sichter sind vor allem weniger anfällig gegenüber Durchsatzschwankungen des Aufgabegutes. Kennfelder, die z.B., wie in Abb. 14 dargestellt, die Abhängigkeit der Trennschärfe von der Trenngrenze und vom Massendurchsatz darstellen, sind jedoch nur selten publiziert worden[12].

Wir beschäftigen uns deshalb an meinem Institut sowohl mit strömungstechnischen Untersuchungen an unterschiedlich beschauften Rotoren[13], als auch in einem weiteren Forschungsvorhaben[14] unter anderem mit der Aufnahme von Kennfeldern derartiger Sichter.

Prinzipiell sollte es möglich sein, mit diesen Windsichtern in den Trenngrenzbereich unterhalb 1 μm vorzustoßen, wenn man Sichterrotoren mit einer Umfangsgeschwindigkeit oberhalb von etwa 150 m/s verwendet. Die aus anderen Bereichen der Technik, z.B. dem Dampfturbinenbau, vorliegenden Erfahrungen mit hochtourig umlaufenden, beschauften Rädern werden jedoch leider bis heute noch nicht auf die

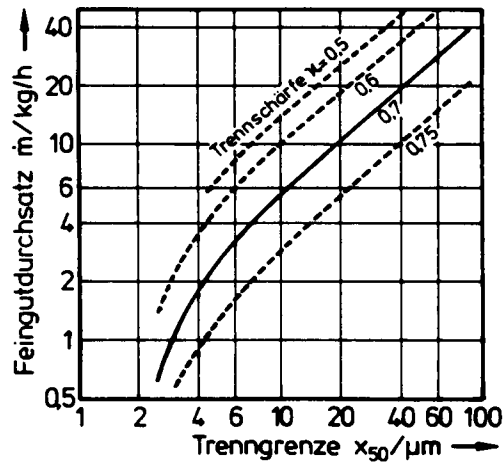


Abb. 14:
Kennfeld eines Abweiseradsichters

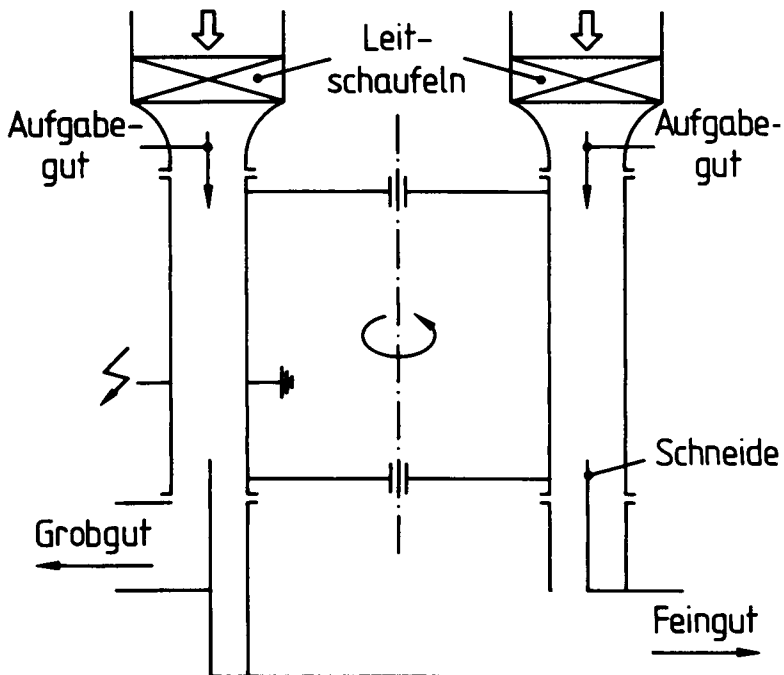


Abb. 15:
Elektrostatisher Windsichter

Vorausberechnung und Dimensionierung derartiger Sichterrotores angewandt. Diese Aufgabe wird seit etwa zwei Jahren von dem an der TU Clausthal eingerichteten SFB 180 „Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen unter besonderen mechanischen, thermischen und chemischen Belastungen“ wahrgenommen.

Trenngrenzen um und unter $1\ \mu\text{m}$ lassen sich nur in Strömungen mit einer Fliehkraftkomponente durchführen. Ein Beispiel sind die beschriebenen Gegenstrom-Fliehkraftsichter. Es gibt jedoch auch noch andere Möglichkeiten, Wir untersuchen an meinem Institut seit einiger Zeit einen Windsichter, bei dem die Trennung in einem elektrischen Feld durchgeführt wird, das einer Drallströmung mit axialer Geschwindigkeitskomponente überlagert ist. Die verwendete Anordnung ist schematisch in Abb. 15 dargestellt [15].

Die Trennzone besteht aus einem rotierenden Ringraum, der von oben nach unten von der Sichtluft durchströmt wird. Durch Leitschaukeln wird der Strömung die mittlere Umfangsgeschwindigkeit des rotierenden Ringraums sowie eine axiale Strömungskomponente aufgeprägt. Das in einem Teilluftstrom dispergierte Aufgabegut wird unmittelbar vor dem Eintritt in die Trennzone beim Durchfliegen einer Corona-Entladungszone partikelgrößenabhängig aufgeladen und in dem radialsymmetrisch in der Trennzone aufgebauten elektrischen Feld unter der Wirkung der Fliehkraft und der elektrischen Kraft in feine und grobe Partikel getrennt. Das Trennkorn bewegt sich dabei auf einer wendelförmigen Bahnkurve durch die Trennzone und trifft an deren unteren Ende auf eine Schneide, die das Fein- und Grobgut voneinander trennt.

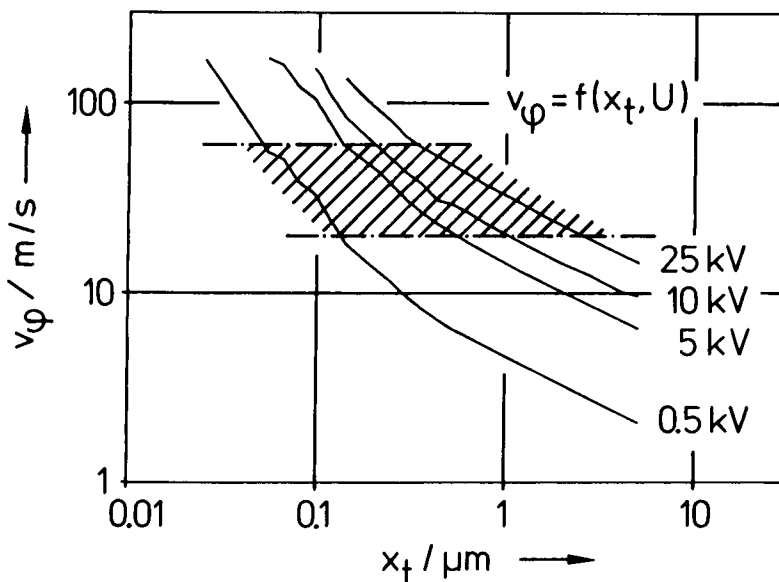


Abb. 16:
Trenngrenzenbereich des Sichters

Unsere bislang vor allem theoretischen Überlegungen zeigen, daß es, wie in Abb. 16 dargestellt, möglich sein sollte, Trenngrenzen zwischen $0,1\ \mu\text{m}$ und $2\ \mu\text{m}$ bei mittleren Umfangsgeschwindigkeiten des Ringraums von $20\ \text{m/s}$ bis $60\ \text{m/s}$ und Spannungen von $0,5\ \text{kV}$ bis $25\ \text{kV}$ zu erreichen. Ein entsprechender elektrostatischer Windsichter wurde inzwischen gebaut. Erste Messungen werden zur Zeit durchgeführt.

3.3 Querstrom-Anordnungen

In Abb. 1 wurde das wohl älteste bekannte Windsichtprinzip, angewandt auf die Trennung von Spreu und Weizen, dargestellt. Diese Art der Durchführung hat jedoch gewisse Nachteile, so daß man einen Querstrom-Windsichter zweckmäßigerweise etwas anders ausführen und betreiben sollte. In Abb. 17 ist eine einfache Querstrom-anordnung dargestellt. Sie besteht aus einem waagrecht angeordneten Kanal rechteckigen Querschnitts, der von links nach rechts mit über dem Kanalquerschnitt konstanter Geschwindigkeit durchströmt wird. Nimmt man an, daß die zu sichtenden Partikel durch einen in der oberen Kanalwand angebrachten schmalen Schlitz mit vernachlässigbarer Anfangsgeschwindigkeit eingebracht werden, so erhält man bei laminarer Partikelumströmung die in Abb. 17 dargestellten geradlinigen Partikelbahnkurven.

Wirkt als Querkraft die Schwerkraft, so sedimentiert jedes Partikel mit seiner stationären Sinkgeschwindigkeit und wird dabei gleichzeitig mit der Geschwindigkeit der Luft nach rechts bewegt.

Die Steigung der Bahnkurven entspricht deshalb dem Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten. Um die Partikel sinkgeschwindigkeitsabhängig aus dem Luftstrom zu trennen, muß die eingezeichnete Abscheidefläche für die einzelnen Partikelklassen

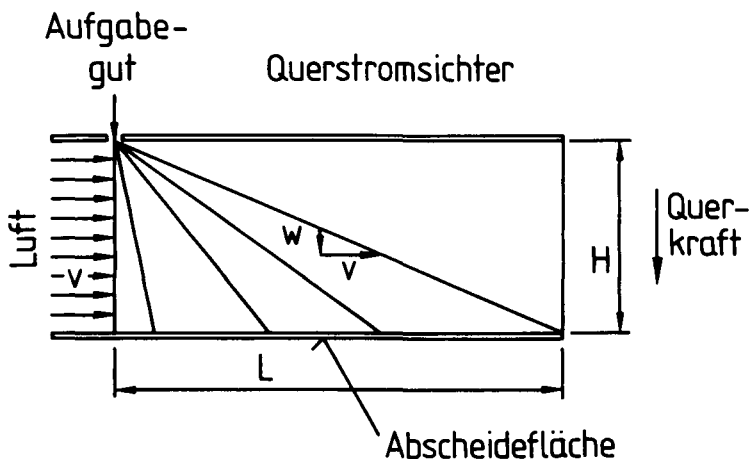


Abb. 17:
Schema einer Querstrom-Anordnung

durchlässig sein. Sie kann deshalb z.B. aus nebeneinanderliegenden Kanälen bestehen, die durch Schneiden voneinander getrennt werden und durch die die einzelnen Partikelklassen abgeführt werden.

Im Gegensatz zu den Gegenstrom-Anordnungen ermöglichen Querstrom-Anordnungen mehrere gleichzeitige Trennungen. Wir haben beispielsweise in Clausthal einen speziellen Querstrom-Windsichter mit zehn Schneiden entwickelt, der elf sich in der mittleren Partikelgröße unterscheidende Fraktionen in einem Trennvorgang liefert [16].

Querstromsichter der in Abb. 17 dargestellten Form unterscheiden sich im Hinblick auf die angewendete Querkraft. Als Querkraften werden die Schwerkraft, Trägheitskräfte, die elektrische Kraft und die Diffusion verwendet. Die Diffusion erzeugt eine Partikelquerbewegung, wenn über die Kanalhöhe z.B. ein Temperaturgefälle angelegt wird. In der dargestellten Form wurden Querstrom-Anordnungen vor allem als Aerosol-Meßgeräte entwickelt und verwendet, wobei gerade und gekrümmte Kanäle benutzt wurden, letztere z.B. in Form von Spiralen oder in wendelförmig auf einem Konus aufgebrachten Kanälen.

Querstromsichter dieser Bauart werden ausschließlich bei so niedrigen Reynoldszahlen betrieben, daß sich eine laminare Kanalströmung einstellt. Probleme treten sowohl infolge Profilausbildung der Strömung als auch bei gekrümmten Kanälen mit sog. Sekundärströmung auf, die z.B. in Form von Görtler-Taylor-Wirbeln die angestrebte determinierte Partikelbewegung stören.

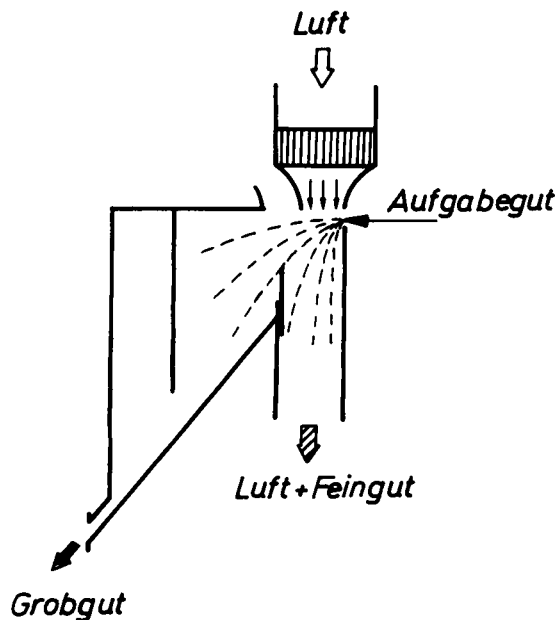


Abb. 18:
Schema des Querstrom-Strahl-Windsichters [5]

H. Rumpf und K. Leschonski[5] haben 1967 erstmals über Querstromtrennungen mit dem in Abb. 18 schematisch dargestellten Querstrom-Strahlwindsichter berichtet. Die Sichtung findet in einem Strömungsmittelstrahl statt, der mit den Mitteln der Windkanaltechnik, d.h. mittels Gleichrichter und Düse erzeugt wird und konstante Geschwindigkeit besitzt. Unmittelbar unter dem Düsenmund wird das Aufgabegut quer in den Luftstrahl ebenfalls mit konstanter Geschwindigkeit eingeschossen. Die Einschußgeschwindigkeiten werden so gewählt, daß die Schwerkraft vernachlässigt werden kann. Sie liegen beim Luft- und Gutstrahl im allgemeinen oberhalb von 20 m/s. Die in den Luftstrahl eingeschleuderten Partikel werden in diesem aufgefächert, wobei die Partikelbahnkurven umso stärker gekrümmt sind, je kleiner die Partikel sind. Dieser Partikelfächer wird von einer entgegen der Strömungsrichtung angeordneten Schneide in Fein- und Grobput getrennt.

Die Verwendung hoher Luft- und Partikelgeschwindigkeit führt zu sehr hohen Massendurchsätzen. In einem 10 cm breiten Sichter ließen sich deshalb bei noch vertretbarer Trennschärfe Massendurchsätze bis zu 4,5 t/h einstellen.

In Abb. 19 sind einige mit einer rotationssymmetrischen Ausführung dieses Sichters gewonnenen Trennkurven, die in Abhängigkeit von der mit dem Medianwert dimen-

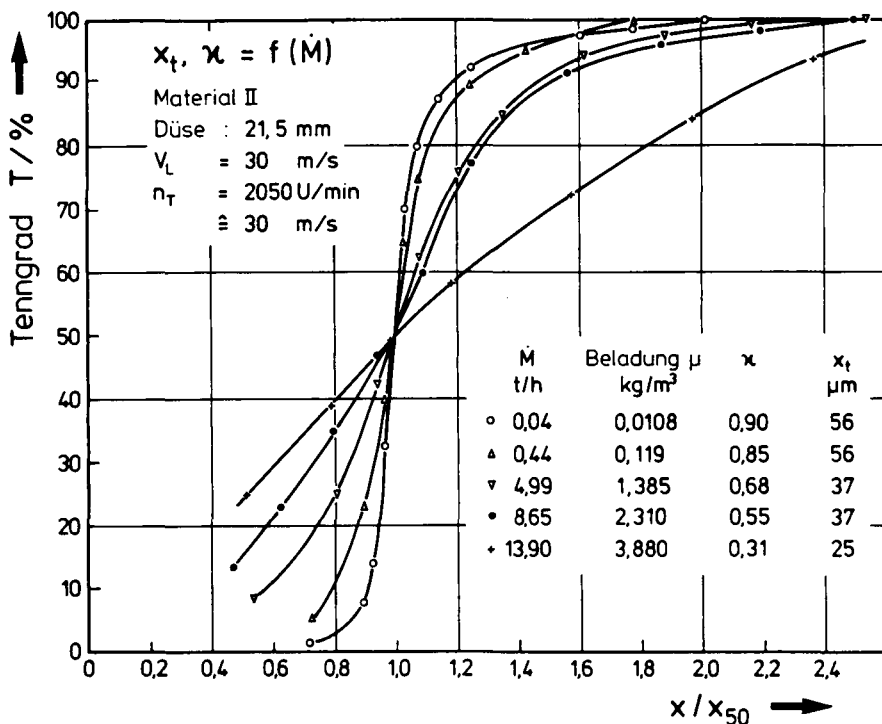


Abb. 19:
Trennkurven des rotationssymmetrischen Querstrom-Strahl-Windsichters

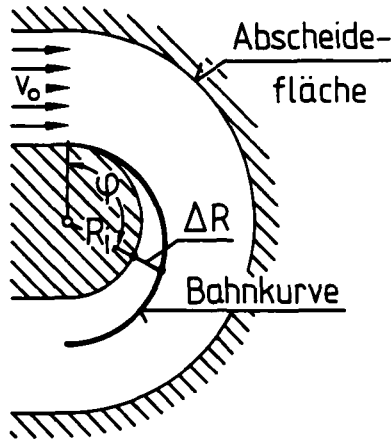


Abb. 20:
Schema des Querstrom-Umlenksichters

sionslos gemachten Partikelgröße aufgetragen sind, wiedergegeben. Man erkennt den bei allen Windsichtern zu beobachtenden Trennschärfe- und Trenngrenzenabfall mit wachsendem Massendurchsatz.

Querstrom-Strahlwindsichter der beschriebenen Bauart sind besonders gut für Trenngrenzen oberhalb von ca. 20 μm geeignet. Will man noch feinere Trenngrenzen bei ebenfalls hohen Massendurchsätzen erreichen, so muß man eine andere Querstrom-Anordnung wählen. H. Rumpf und K. Leschonski haben deshalb die in Abb. 20 dargestellte Anordnung, den Querstrom-Umlenksichter, für Feinsttrennungen vorgeschlagen, den K. Maly[17] untersuchte.

In dieser Anordnung wird die Kanalströmung um eine abgerundete Kante um bis zu 180° umgelenkt. Das zu sichtende Gut wird, in einem Teilluftstrom dispergiert, in Wandnähe zugeführt. Die Strömungsumlenkung wird bei diesem Sichter durch den sogenannten Coanda-Effekt unterstützt, der ein frühzeitiges Ablösen der Strömung von der Wand verhindert. Die Partikel werden in der weiter außen strömenden feststofffreien Luft aufgefächert. Sie können mit einer oder mehreren Schneiden in Fein- und Grobgut, bzw. in mehrere Sinkgeschwindigkeitsklassen getrennt werden. Für eine angenommene Potentialströmung läßt sich die radiale Partikelbewegung, ΔR , aus:

$$\Delta R = \frac{w_{gt} v_0}{g} \varphi = \frac{Q_p}{18\eta} x_i^2 v_0 \varphi \quad (10)$$

berechnen.

Danach muß man das Produkt $x_i^2 v_0$ konstant halten, wenn bei veränderter Trennkorngröße mit derselben Schneideneinstellung (ΔR) gesichtet werden soll. Eine Verringerung der Trenngrenze um den Faktor 10 verlangt eine Geschwindigkeitserhöhung um

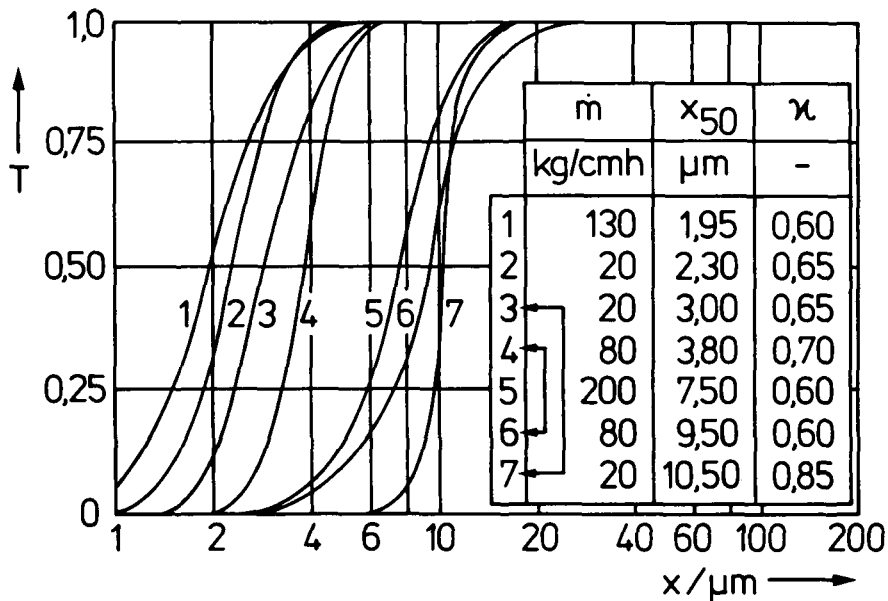


Abb. 21:
Trennkurven des Umlenk-Sichters[17]

den Faktor 100. Will man Trennungen im Trenngrenzenbereich um 1 μm erzielen, so sind Luftgeschwindigkeiten oberhalb von ca. 150 m/s erforderlich.

In Abb. 21 sind Trennkurven dieses inzwischen von einer japanischen Firma hergestellten Windsichters dargestellt. Die Trenngrenzen variieren zwischen 1,95 μm und 10,5 μm . Bei einer mit den beschriebenen Spiralwindsichtern vergleichbaren Trennschärfe, κ , ist der einstellbare Massendurchsatz sehr viel höher. Ein 10 cm breiter Sichter kann bei Trenngrenzen um 2 μm mit Massendurchsätzen bis zu 1,5 t/h betrieben werden, vergleichbare Spiralwindsichter erreichen kaum den zehnten Teil dieses Durchsatzes.

Herr Kollege Brauer, meine sehr geehrten Damen und Herren,
im Rahmen der zur Verfügung stehenden Zeit habe ich Ihnen einen nur unvollkommenen Überblick über das Gebiet der Windsichtung geben können. Ich hoffe, daß es mir gelungen ist, Ihnen die beachtliche Vielfalt der Möglichkeiten aufzuzeigen und zu verdeutlichen, daß sich heute das Windsichten nicht nur auf die Trennung der Spreu vom Weizen beschränkt.

Literatur

- [1] Monumente großer Kulturen: Ägypten. H. Ebeling Verlag, Luxembourg, 1979, S. 80.
- [2] F.M. Feldhaus, Die Technik der Vorzeit, der geschichtlichen Zeit und der Naturvölker. Heinz Moos Verlag München, 1965, 1337–1338.

- [3] K. Leschonski, Classification of Particles in Gases. IFPRI-Report, Mai 1981, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik, TU Clausthal.
- [4] K. Leschonski, Kennzeichnung einer Trennung. Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 4. Auflage, Bd. 2 (1972) S. 35–42.
- [5] H. Rumpf, K. Leschonski, Prinzipien und neue Verfahren der Windsichtung. Chemie-Ing.-Techn. 39 (1967) 1231–1241.
- [6] K. Leschonski, Das Klassieren disperser Feststoffe in gasförmigen Medien. Chemie-Ing.-Techn. 49 (1977) 708–719.
- [7] K. Leschonski, H. Rumpf, Principle and Contribution of Two New Air Classifiers for Size Analysis. Powder Technol. 2 (1968/69) 175–185.
- [8] M. Weilbacher, Untersuchungen zur Schwerkraft- und Fliehkraftsichtung für Teilchengrößenanalysen. Diss. Univ. Karlsruhe, 1968.
- [9] H. Rumpf, Über die Sichtwirkung einer ebenen spiraligen Luftströmung. Diss. TH Karlsruhe, 1939.
- [10] F. Ebert, Berechnung rotationssymmetrischer turbulenter Grenzschichten mit Sekundärströmung. Diss. TH Karlsruhe, 1967.
- [11] H. Rumpf, F. Kaiser, Weiterentwicklung des Spiralwindsichters (Wirbelsichters). Chem.-Ing.-Techn. 24 (1952) 129–135.
- [12] R. Fritsch, Neue Fliehkraftsichter mit ungewöhnlich weitem Trennbereich. Chemie-Technik 6 (1977) 473–476.
- [13] DFG Le 410/12-2, DFG-Forschungsvorhaben: Experimentelle und theoretische Untersuchung der Strömung in beschaufelten Rotoren von Abweiseradsichtern. Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Umweltverfahrenstechnik der TU Clausthal.
- [14] SFB 180/A3, Die Feinsttrennung in Abweiseradsichtern und deren Anwendungsgrenzen. Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Umweltverfahrenstechnik der TU Clausthal.
- [15] K. Leschonski, The Feasibility of Producing Small Cut Sizes in an Electrostatic Classifier. Powder Technol. 51 (1987) 49–59.
- [16] K.L. Metzger, Die Untersuchung eines Querstromtrennverfahrens zur automatischen Partikelgrößenanalyse. Diss. TU Clausthal, 1977.
- [17] K. Maly, Untersuchung der Partikel-Strömungsmittel-Wechselwirkung im Strahlumlenkwindsichter. Diss. Univ. Karlsruhe, 1978.